

ЗАХАРОВ ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
АНИЗОТРОПНЫХ ОБМЕННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ  
В МОНОКРИСТАЛЛАХ  $\text{NaV}_2\text{O}_5$  И  $\text{TiOSi}$   
МЕТОДОМ ЭПР**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико – математических наук

Казань – 2007

Работа выполнена на кафедре «Квантовая электроника и радиоспектроскопия»  
Казанского государственного университета

Научный руководитель: доктор физико – математических наук,  
профессор Ерёмин Михаил Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико – математических наук,  
профессор Садыков Эдгар Камилович,  
кандидат физико – математических наук,  
с.н.с. Воронкова Виолета Константиновна

Ведущая организация: Уральский государственный университет.

Защита состоится «31» мая 2007 г. в 14<sup>30</sup> часов на заседании  
Диссертационного совета Д. 212.081.15 при Казанском государственном университете им.  
В. И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного  
университета им. В. И. Ульянова-Ленина.

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская,  
18, КГУ, научная часть

Автореферат разослан «\_\_\_\_» апреля 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н.

Ерёмин М. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Соединения переходных металлов с пониженной пространственной размерностью предоставляют уникальную возможность изучения квантовых эффектов, проявляющихся макроскопически. Усиление роли тепловых и квантовых флуктуаций в низкоразмерных спиновых системах приводит к возникновению новых фаз. В качестве примера можно указать на спин-пайерлсовский переход в  $\text{CuGeO}_3$ , на квазиодномерные соединения с волнами зарядовых плотностей, на системы с зарядовым и орбитальным упорядочениями.

Большое внимание привлекает квантовый эффект, предсказанный теоретически Латтинжером в 1963 году [1], который недавно подтвердился при исследовании карбоновых нанотрубок [2] – разделение спиновых и зарядовых степеней свободы (жидкость Латтинжера – вместо ферми-жидкостного состояния). В этой связи, естественно, что свойства квазиодномерных систем находятся в центре внимания современных исследований по физике конденсированного состояния.

Исследуемое в настоящей работе квазиодномерное соединение  $\text{NaV}_2\text{O}_5$  является системой со смешанной валентностью ионов ванадия  $\text{V}^{4.5+}$ . По мере понижения температуры (при  $T_{\text{CO}} = 34 \text{ K}$ ) оно претерпевает фазовый переход в состояние с упорядочением заряда  $\text{V}^{4+} - \text{V}^{5+}$ . В случае  $\text{TiOCl}$ , основным состоянием иона  $\text{Ti}: 3d^1$  является орбитальный триплет  $t_{2g}$ , что может привести к новым нетривиальным физическим свойствам этого соединения.

Метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) является эффективным методом исследования электронного строения конденсированных сред. В частности, он позволяет получить информацию о параметрах анизотропных обменных взаимодействий, о тензоре гиромагнитных отношений, о процессах спин-спиновой и спин-решеточной релаксации.

**Цель работы.** Цель работы состояла в определении основных состояний ионов ванадия и титана в кристаллах  $\text{NaV}_2\text{O}_5$  и  $\text{TiOCl}$ , в установлении природы анизотропных обменных взаимодействий между спинами, в описании особенностей спиновой релаксации в этих двух квазиодномерных магнитно-концентрированных

системах. Для этого были произведены систематические исследования положения и ширины линии ЭПР в данных монокристаллах и дана их интерпретация на основе существующих представлений в теории магнитного резонанса концентрированных магнетиков с привлечением микроскопической теории суперобмена и кристаллических полей.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующих результатах:

1. Проведены измерения спектров электронного парамагнитного резонанса  $\alpha'$ - $\text{NaV}_2\text{O}_5$  в широком температурном интервале вплоть до  $T \sim 800 \text{ K}$  в двух взаимно-перпендикулярных ориентациях.
2. Выполнен микроскопический расчёт параметров анизотропных обменных взаимодействий в  $\alpha'$ - $\text{NaV}_2\text{O}_5$  с явным учётом пространственного распределения электронов в основных и возбужденных состояниях.
3. Прямыми измерениями температурных зависимостей формы линии ЭПР и проводимости на образце  $\text{La}_{0.70}\text{Ca}_{0.25}\text{Ba}_{0.05}\text{MnO}_3$  доказано, что доминирующий вклад в асимметрию линии ЭПР связан с проводимостью.
4. Использование кристаллов  $\text{TiOCl}$  высокого качества позволило впервые получить воспроизводимые данные электронного магнитного резонанса в широком диапазоне температур  $4 \text{ K} < T < 500 \text{ K}$ .
5. Определён энергетический интервал до ближайшего возбужденного состояния в  $\text{TiOCl}$  и зарегистрировано наличие взаимодействия Дзялошинского - Мория между ионами титана из соседних цепочек.

**Научная и практическая значимость работы.** Полученные результаты являются качественно новыми и вносят существенный вклад в понимание физических свойств систем  $\alpha'$ - $\text{NaV}_2\text{O}_5$  и  $\text{TiOCl}$ . Результаты исследований могут быть использованы при теоретических и экспериментальных исследованиях физических свойств новых материалов, при постановке дипломных и аспирантских работ.

**Достоверность результатов** работы обеспечена комплексным характером выполненных экспериментальных исследований, их многократной повторяемостью,

непротиворечивостью результатов, полученных различными методами, а также совпадением контрольных экспериментов и теоретических расчетов с установленными фактами, опубликованными в научных статьях, обзорах и монографиях.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международной летней школе PITP „Квантовый магнетизм“ (Лезуш, Франция, 6-23 июня 2006 г.); Весенних встречах немецкого физического общества DPG (26-31 марта 2006 г.); Международной школе-семинаре «Новые магнитные материалы микроэлектроники» XIX (Москва, 28 июня – 2 июля 2004 г.); Международной конференции NanoRes (Казань, 15-19 августа 2004 г.); Молодёжной научной школе «Магнитный резонанс и его применения» (Казань, 11-13 ноября 2003 г., 15-19 августа 2004 г.); Научной конференции “Материалы и технологии XXI века” (Казань, 12-15 марта 2004 г.); на семинарах кафедры Квантовой электроники и радиоспектроскопии Казанского государственного университета.

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в трёх научных статьях (Письма в ЖЭТФ, Physical Review Letters и Physical Review B), а также в пяти расширенных тезисах международных и всероссийских конференций.

**Личный вклад автора** состоит в:

- проведении измерений электронного парамагнитного резонанса и удельного электросопротивления методом диэлектрической спектроскопии, обработке результатов измерений;
- микроскопическом расчёте параметров анизотропных обменных взаимодействий;
- участии в обсуждении результатов эксперимента, их теоретическом описании, написании статей.

Ряд экспериментальных исследований был выполнен в лаборатории Аугсбургского университета, Германия. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты 03-02-17430-а и 06-02-17197-а.

## **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 129 наименований. Работа изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 40 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обосновываются актуальность диссертационной работы, формулируются её цели и задачи.

В **первой главе** излагаются основы микроскопической теории обменного взаимодействия. Описываются механизмы изотропного и анизотропных обменных взаимодействий с иллюстрацией виртуальных процессов переноса электрона через промежуточные диамагнитные ионы. Обсуждается явление квантовой интерференции суперобмена, особенности суперобмена при малых энергиях переноса электрона и двойной обмен.

**Вторая глава** посвящена экспериментальной методике исследований концентрированных магнитных систем методом электронного парамагнитного резонанса. Обсуждаются теоретические основы метода, измеряемые величины и их физическое значение, приводится описание установки. Оцениваются все возможные источники спиновой релаксации, уширяющие линию поглощения, а также приводится методика определения типа обмена и оценки обменных параметров по температурной зависимости и величине ширины линии.

Важнейшей для оценки параметров обмена характеристикой является ширина линии ЭПР, которая пропорциональна скорости спиновой релаксации. В магнитно-концентрированных соединениях переходных металлов наиболее существенными источниками уширения линии являются анизотропные обменные взаимодействия, а диполь-дипольное взаимодействие играет второстепенную роль. Поэтому измерения ширины линии ЭПР дают уникальную возможность определить параметры анизотропного обмена и, в частности, параметры Дзялошинского-Мории. Как недавно было показано в [3], эти взаимодействия вызывают кардинально различную

температурную зависимость ширины линии  $\Delta H$  при низких температурах  $T \ll J/k_B$ , где  $J$  – интеграл изотропного обмена. Это обстоятельство позволяет однозначно установить тип анизотропного обмена в каждом случае. Абсолютные же величины обменных параметров могут быть определены путем сопоставления рассчитанных и измеренных ширин линий. В высокотемпературном приближении  $T > J/k_B$  ширина линии рассчитывается по формуле:

$$\Delta H = \frac{1}{g\mu_B} \frac{M_2}{J}, \quad \text{где} \quad M_2 = -\frac{\text{Sp}([\hat{H}_{\text{int}}, S^+][\hat{H}_{\text{int}}, S^-])}{\text{Sp}[S^+, S^-]}.$$

Здесь  $M_2$  – второй момент линии  $M_2 = h^2 \langle (\nu - \nu_0)^2 \rangle$ ,  $J$  – параметр изотропного обменного взаимодействия, а  $\hat{H}_{\text{int}}$  – гамильтониан взаимодействия, уширяющего линию. В случае взаимодействия Дзялошинского-Мория (ДМ) он имеет вид  $\hat{H}_{DM}^{(ab)} = d_{ab} [S_a \times S_b]$ , а в случае симметричного анизотропного обмена  $\hat{H}_{AE}^{(ab)} = S_a \cdot D \cdot S_b$ . Здесь  $d_{ab}$  и  $D$  – параметры соответствующих взаимодействий. Направление вектора ДМ определяется по известному правилу  $d_{ab} = d_0 [n_{ac} \times n_{bc}]$ , где вектора  $n_{ac}$  и  $n_{bc}$  соединяют мостиковый ион  $c$  с взаимодействующими ионами  $a$  и  $b$ , соответственно [4].

В **третьей главе** анализируются спектры ЭПР монокристалла  $\alpha'$ - $\text{NaV}_2\text{O}_5$ . Столь повышенное внимание к этому кристаллу объясняется фазовым переходом в состояние с упорядочением зарядов при  $T_{\text{CO}} \approx 34$  К. Загадочным и не понятым до начала наших исследований оставалось поведение ширины линии с изменением температуры. Следуя теории Ошикавы-Аффлека, можно предположить, что возрастающее

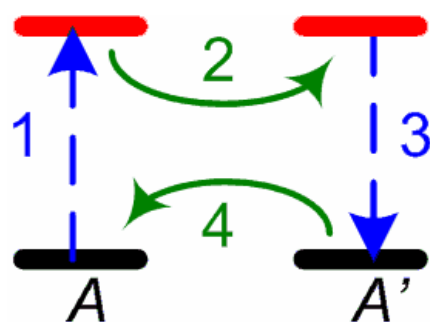


Рис. 1. Схема «кругового» симметричного анизотропного обмена.

уширение линии электронного парамагнитного резонанса, достигающее в этом кристалле  $\Delta H \approx 200$  Э при комнатной температуре, связано с анизотропным спин-спиновым взаимодействием симметричного типа. Однако оценка параметров

анизотропного обмена по Блини - Бауэрсу [5] и учёт обычных диполь-дипольных вкладов даёт значение ширины линии на порядок величины меньше экспериментально наблюдаемого. В этой связи были предприняты дополнительные измерения ширины линии в более широком интервале температур и был выполнен микроскопический анализ возможных источников симметричного анизотропного обменного взаимодействия, включая процессы виртуальных возбуждений с одновременным включением спин-орбитального взаимодействия на обоих магнитных центрах. Данный механизм анизотропного обмена существенно отличается от изначально предложенного Блини и Бауэрсом [5]. Он может быть охарактеризован одновременным переносом электронов между основными и возбуждёнными орбитальными состояниями взаимодействующих ионов. Переходы между этими уровнями на каждом ионе происходят за счёт спин-орбитального

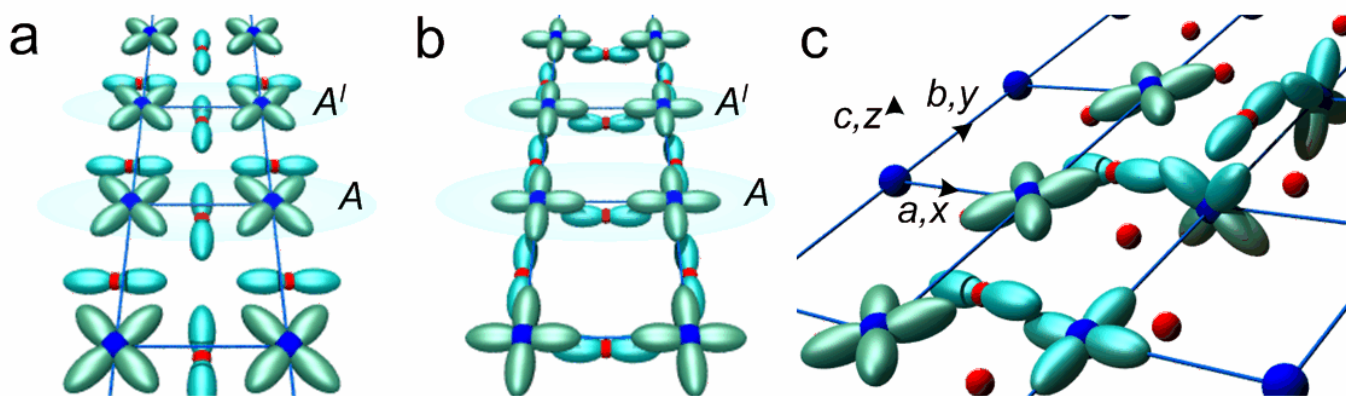


Рис. 2. Схематическое изображение орбитальных состояний и путей обменного взаимодействия в основном (a) и возбуждённом (b) состояниях иона ванадия внутри структурных лестниц  $\alpha'$ - $\text{NaV}_2\text{O}_5$ . На рисунке (c) изображены пути межлестничного обмена.

взаимодействия, что позволяет замкнуть круг обмена, как показано на рисунке 1.

Как подобный процесс происходит в реальной структуре, проиллюстрировано на Рис. 2. Видно, что имеется хорошее перекрытие как между основными  $|xy\rangle$ , так и возбуждёнными  $|x^2 - y^2\rangle$  орбиталями ионов ванадия по  $\pi$  и  $\sigma$  связям с  $p$ -орбиталями ионов кислорода, соответственно. На каждом центре данные состояния связаны компонентой оператора спин-орбитального взаимодействия  $l_z$ :  $\langle x^2 - y^2 | l_z | xy \rangle = -2i$ . Расчёт величины обменной константы в данном случае дал



$D_{zz} \sim 0.6$  мэВ, что объясняет наблюдаемую ширину линии в высокотемпературном пределе ( $\Delta H \approx 300$  Э).

Далее, дополнительный учёт взаимодействий между структурными «лестницами», образованными ионами ванадия, позволяет улучшить описание угловой зависимости ширины линии поглощения (см. Рис. 3(i)). Возможные пути межлестничного обмена иллюстрируются на рисунке 2(с). Расчёт показал, что они вызывают уширение линии ЭПР, когда внешнее магнитное поле  $H$  направлено вдоль оси  $a$  кристалла. На рисунке 3(ii) показано, что они оказывают наибольшее влияние

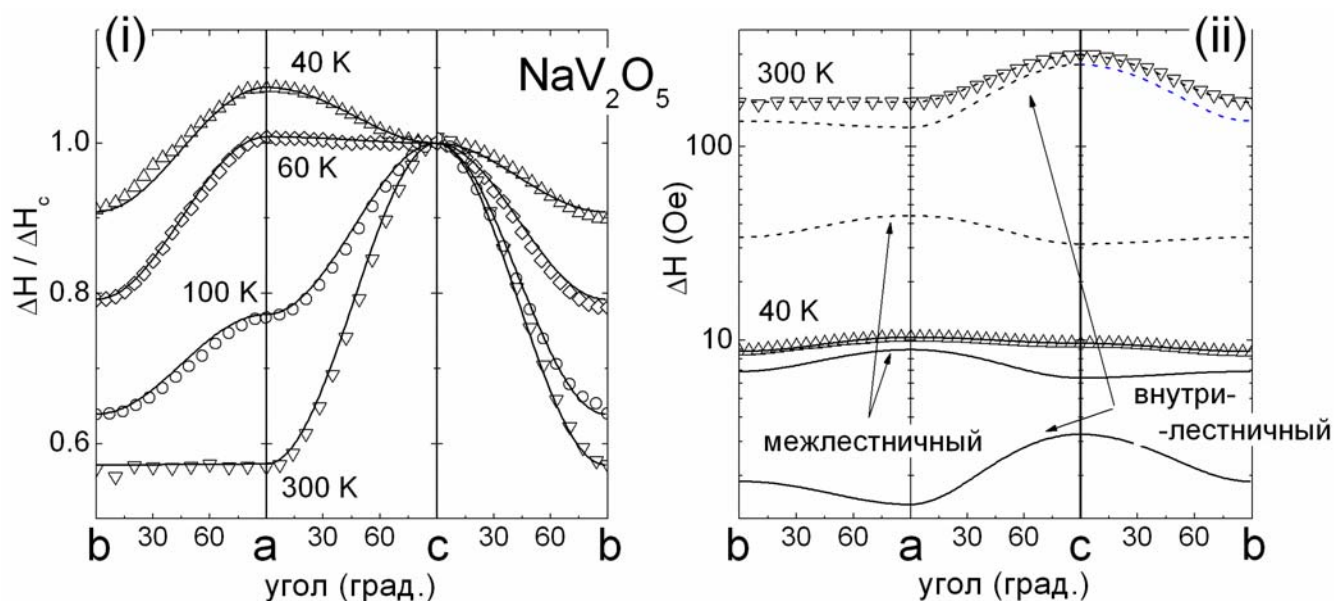


Рис. 3. Угловые зависимости ширины линии ЭПР в  $\alpha'$ - $\text{NaV}_2\text{O}_5$ , нормированные на  $\Delta H_c$ . Справа показаны вклады внутри- и межлестничного обмена при  $T = 300$  К и  $T = 40$  К.

на спиновую релаксацию при низких температурах, что связано с наличием зарядовых флуктуаций в системе. В зарядово-упорядоченном состоянии внутрилестничный обмен значительно ослаблен, в то время как межлестничный ожидается того же порядка величины.

Согласно теории Ошикавы-Аффлека, отношение температурных зависимостей при неизменных параметрах взаимодействия должно быть постоянным. Как видно из Рис. 4, это не выполняется уже начиная с температур порядка 150 К. Наиболее вероятное объяснение – температурная перестройка параметров взаимодействия, которая неизбежно возникает из-за изменения плотности распределения электрона на перекладинах структурных лестниц. Фрагмент  $V^{4.5+} - V^{4.5+}$  по мере понижения температуры превращается в  $V^{4+} - V^{5+}$ .

Таким образом, температурная зависимость ширины линии свидетельствует о развитии зарядовых флуктуаций уже при температурах в разы превышающих температуру кооперативного перехода в зарядово-упорядоченное состояние (зигзагообразное упорядочение ионов  $V^{5+}$ , такое чтобы кулоновское отталкивание было минимальным). Факт наличия флуктуаций зарядового распределения при столь высоких температурах находится в согласии с результатами, полученными рядом других экспериментальных методов, например, методом оптической спектроскопии [6].

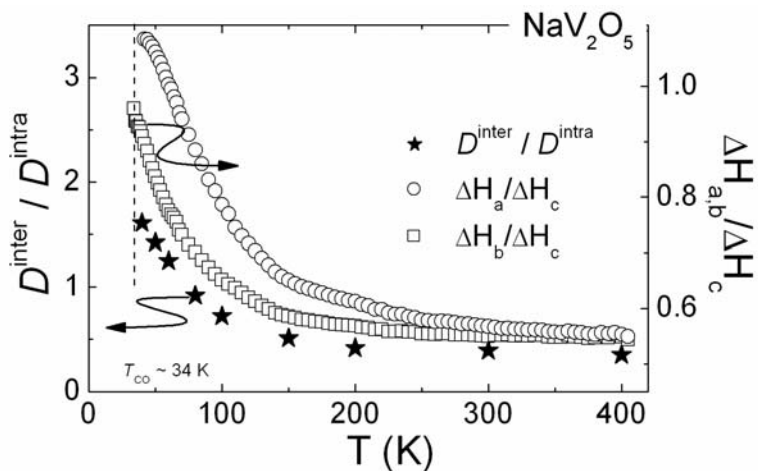


Рис. 4. Температурная зависимость отношения внутри- и межлестничных параметров симметричного анизотропного обмена, а также нормированных ширин линий ЭПР.

В  $\alpha'$ - $NaV_2O_5$  ширина линии монотонно возрастает с температурой, что является типичным признаком доминирования симметричного анизотропного обмена в системе [3]. Температурная зависимость ширины линии ЭПР во втором соединении, изучавшемся в рамках данной работы –  $TiOCl$ , более сложная и

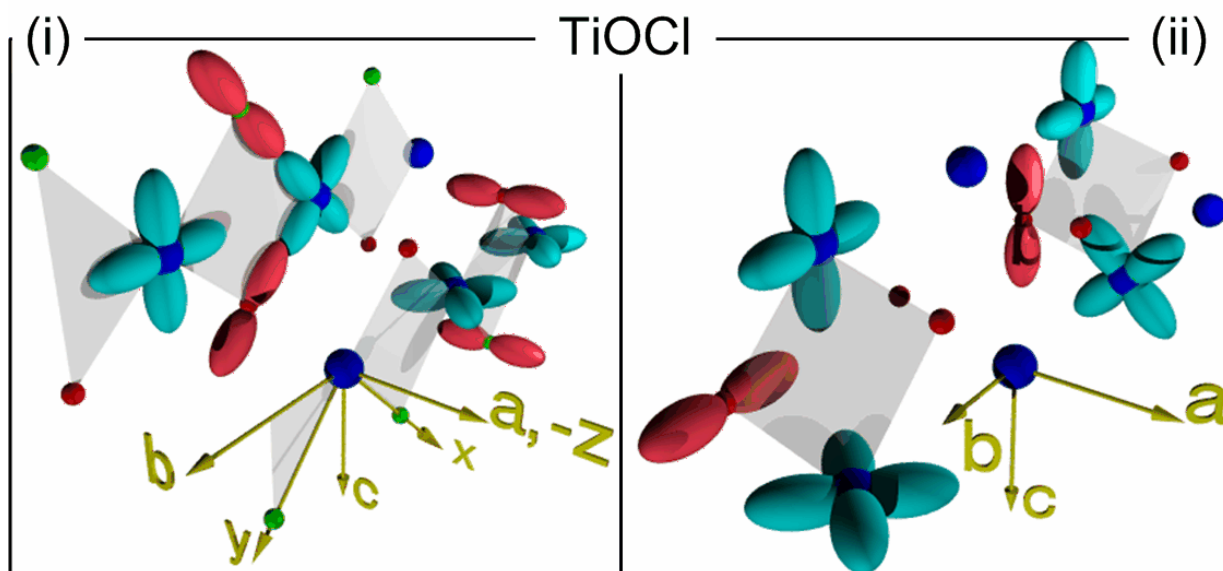


Рис. 5. Схематическое изображение путей симметричного анизотропного обмена в  $TiOCl$ .

обнаруживает дополнительно тенденцию к возрастанию при низких температурах. Мы связываем это с влиянием антисимметричного обменного взаимодействия, что обосновывается на основе микроскопической картины распределения неспаренных спинов.

В четвёртой главе диссертации рассматриваются возможные процессы симметричного анизотропного обмена в  $\text{TiOCl}$ . Наиболее эффективные пути обмена изображены на Рис. 5. Все они приводят к уширению линии при приложении магнитного поля вдоль оси  $a$  кристалла. Отношения ширин линий таковы:  $\Delta H_a : \Delta H_b : \Delta H_c = 2 : 1 : 1$ .

В то же время, анализ антисимметричного анизотропного обменного взаимодействия показал, что данный процесс уширяет линию электронного парамагнитного резонанса в основном вдоль оси  $b$ . Это можно видеть из рисунка 6, где показаны все связи иона  $\text{Ti}^{3+}$  с ближайшими соседями и вектора Дзялошинского-Мория для каждой из этих связей. Видно, что обмен вдоль оси  $b$  происходит через два промежуточных иона, и соответствующие вектора антиколлинеарны. Поэтому, суммарная

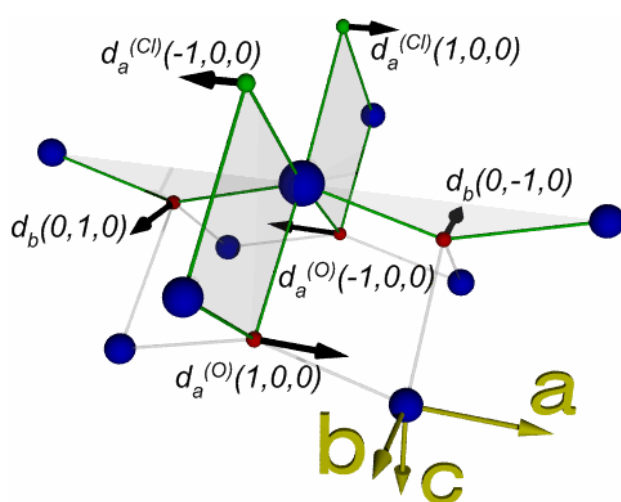


Рис. 6. Связи иона  $\text{Ti}^{3+}$  с его ближайшими соседями в  $\text{TiOCl}$  и вектора ДМ, соответствующие каждой связи.

компонента вектора ДМ вдоль оси  $a$  пренебрежимо мала. Вектор для взаимодействия между ионами титана вдоль оси  $a$  нескомпенсирован, что приводит к уширению линии ЭПР вдоль оси  $b$ .

Согласно расчёту, произведённому недавно Ошикавой и Аффлеком [3], анизотропия симметричного типа вызывает линейное возрастание ширины линии ЭПР при низких температурах  $\Delta H_{AE}(T = J/k_B) \propto T$ , в то время как для альтернированного взаимодействия ДМ характерно увеличение ширины линии при понижении температуры, т. е.  $\Delta H_{DM}(T = J/k_B) \propto 1/T^2$ . Поэтому, следует ожидать,

что  $\Delta H$  будет максимальна вдоль оси  $a$  при высоких температурах, изменяя свою анизотропию под влиянием взаимодействия ДМ при её понижении.

Эти теоретические рассуждения прекрасно подтверждаются экспериментальными данными. На Рис. 7 показано, что температурная и угловая зависимости ширины линии хорошо объясняются в рамках этой простой модели спин-спиновых взаимодействий. При высоких температурах доминирует симметричное анизотропное обменное взаимодействие. При температурах порядка 90 К, вследствие конкуренции симметричной и антисимметричной частей анизотропного обменного взаимодействия ход температурных зависимостей кардинально изменяется и вблизи температуры фазового перехода  $T_{c1} = 67$  К ширина линии максимальна при приложении магнитного поля вдоль оси  $b$  кристалла. Это полностью согласуется с анизотропией, ожидаемой при наличии взаимодействия Дзялошинского - Мория между ионами титана из соседних цепочек.

Кроме того, измерения угловой зависимости положения линии магнитного резонанса в  $\text{TiOCl}$  позволили оценить энергию первого возбуждённого уровня как  $\Delta_1 = 0.2(1)$  эВ.

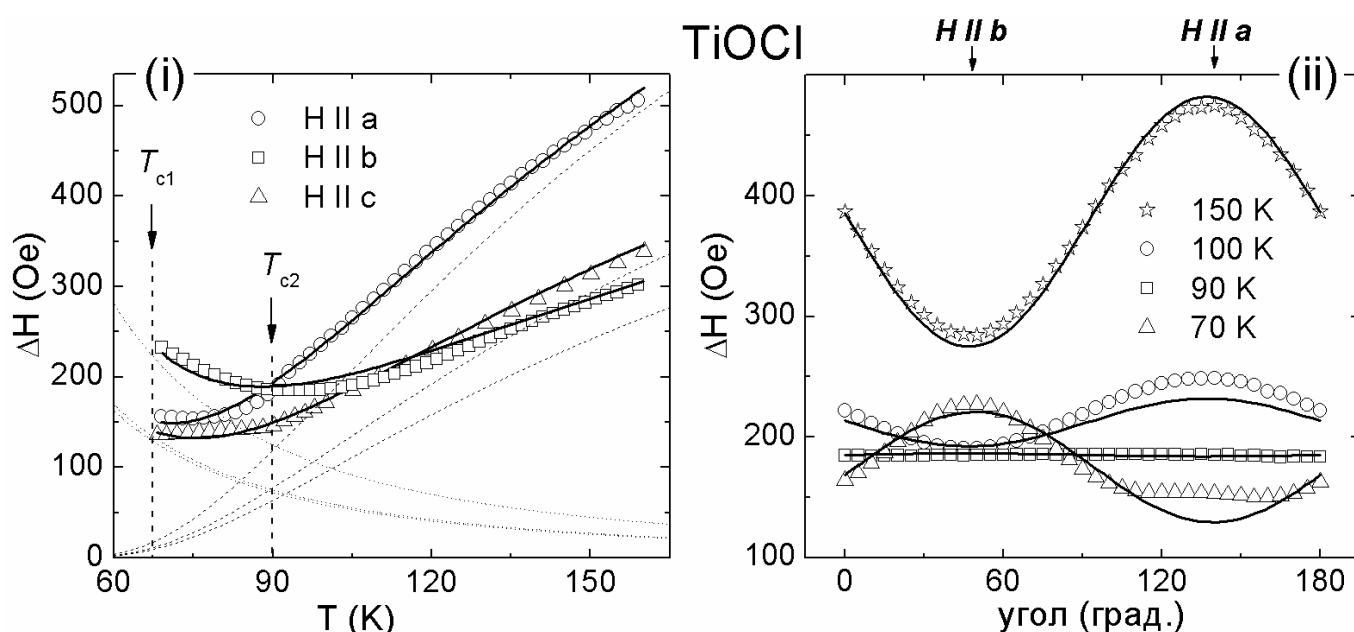


Рис. 7. Температурная и угловая зависимости ширины линии ЭПР в  $\text{TiOCl}$ . Экспериментальные данные описаны конкуренцией симметричного и антисимметричного анизотропных обменных взаимодействий.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Ширина линии ЭПР в  $\text{NaV}_2\text{O}_5$  обусловлена анизотропными обменными взаимодействиями между фрагментами ванадия переменной валентности ( $\text{V}^{4.5+} - \text{V}^{4.5+}$ ), связанными обменным взаимодействием в квазиодномерные цепочки. Аномально большое значение параметров симметричного анизотропного обмена объяснено эффектами квантовой интерференции перескоков электрона по основным и возбуждённым состояниям ванадия.
2. Обнаружены отклонения относительных температурных зависимостей ширины линии ЭПР, снятых при различных ориентациях кристалла, от постоянного значения. Они интерпретированы как проявление флуктуаций валентности ионов ванадия  $\text{NaV}_2\text{O}_5$ . Эти флуктуации начинаются уже при температурах, превышающих в разы температуру зарядового упорядочения. По мере понижения температуры фрагменты переменной валентности ванадия постепенно переходят в состояния  $\text{V}^{4+} - \text{V}^{5+}$ , а при  $T_{\text{CO}} = 34 \text{ K}$  происходит окончательное кооперативное упорядочение в зигзагообразные структуры, так чтобы кулоновское отталкивание между ионами  $\text{V}^{5+}$  оказалось минимальным.
3. Измеренные значения компонент  $g$  тензора в  $\text{TiOCl}$  однозначно указывают, что основные состояния ионов  $\text{Ti}^{3+}$  орбитально невырождены. Оцененный энергетический интервал до ближайшего возбужденного состояния оказался порядка тысячи  $\text{см}^{-1}$ , что свидетельствует о значительном подавлении динамических орбитальных эффектов. Проанализированы возможные обменные взаимодействия как внутри цепочек ионов титана, так и между цепочками.
4. В широком интервале температур измерена угловая зависимость ширины линии ЭПР в  $\text{TiOCl}$ , позволившая уверенно зарегистрировать наличие антисимметричного обменного взаимодействия (Дзялошинского - Мория) между ионами титана из соседних цепочек.

Все экспериментальные данные интерпретированы на основе микроскопической теории суперобмена с учетом промежуточных лигандных мостиков из ионов кислорода.

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ**  
**ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:**

- A1. Unconventional anisotropic superexchange in  $\alpha'$ - $\text{NaV}_2\text{O}_5$  / M. V. Eremin, D. V. Zakharov, R. M. Eremina, J. Deisenhofer, H.-A. Krug von Nidda, G. Obermeier, S. Horn, A. Loidl // Physical Review Letters.- 2006.- Т. 96.- С. 027209.
- A2. Spin dynamics in the low-dimensional magnet  $\text{TiOCl}$  / D. V. Zakharov, J. Deisenhofer, H.-A. Krug von Nidda, P. Lunkenheimer, J. Hemberger, M. Hoinkis, M. Klemm, M. Sing, R. Claessen, M. V. Eremin, S. Horn, A. Loidl // Physical Review B.- 2006.- Т. 73.- С. 094452.
- A3. Захаров Д. В. Природа асимметрии линии ЭПР в  $\text{La}_{0.70}\text{Ca}_{0.25}\text{Ba}_{0.05}\text{MnO}_3$  / Д. В. Захаров, Д. Г. Зверев, В. В. Изотов // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики.- 2003.- Т. 78.- № 6.- С. 854-856.
- A4. Spin relaxation in  $\text{TiOCl}$  / D. Zakharov, J. Deisenhofer, H.-A. Krug von Nidda, P. Lunkenheimer, M. Hoinkis, A. Loidl // Abstract of Frühjahrstagungen of Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Dresden, Germany, 27-31 марта 2006 г.- D.: TU Dresden Verlag.- 2006.- С. 253.
- A5. Zakharov D. V. Anisotropic exchange parameters deduced from ESR study of  $\text{NaV}_2\text{O}_5$  / D. V. Zakharov, M. V. Eremin, H.-A. Krug von Nidda // Сборник трудов XIX международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники», Москва, 28 июня - 2 июля 2004 г.- Москва: Изд-во МГУ.- 2004.- С. 703-705.
- A6. Electron Spin Resonance of  $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$  / D. V. Zakharov, D. G. Zverev, M. V. Eremin, Ya. M. Mukovskii // Abstracts of international conference «Nanoscale properties of condensed matter probed by resonance phenomena», Kazan, 15-19 August 2004.- Казань: Изд-во КГУ.- 2004.- С. 141.
- A7. Zakharov D. V. Anisotropic exchange in  $\text{NaV}_2\text{O}_5$ : an ESR study / D. V. Zakharov, M. V. Eremin, H.-A. Krug von Nidda // Thesis of VII international youth scientific school “New aspects of magnetic resonance application”, Kazan, 15 - 19 August 2004.- Казань: Изд-во КГУ.- 2004.- С. 118-121.

- A8. Захаров Д. В. ЭПР в  $\text{La}_{0.70}\text{Ca}_{0.25}\text{Ba}_{0.05}\text{MnO}_3$  / Д. В. Захаров, Д. Г. Зверев, В. В. Изотов // Тезисы всероссийской молодёжной научной школы «Новые аспекты применения магнитного резонанса», Казань, 11 – 13 ноября 2003 г.- Казань: Изд-во КГУ.- 2003.- С. 49-53.

### **ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Luttinger J. M. An exactly soluble model of a many-fermion system / J. M. Luttinger // Journal of Mathematical Physics.- 1963.- Т. 4.- С. 1154-1162.
- [2] Luttinger-liquid behaviour in carbon nanotubes / M. Bockrath, D. H. Cobden, J. Lu [et al.] // Nature.- 1999.- Т. 397.- С. 598-601.
- [3] Oshikawa M. Electron spin resonance in  $S=1/2$  antiferromagnetic chains / M. Oshikawa, I. Affleck // Physical Review B.- 2002.- Т. 65.- С. 134410.
- [4] Москвин А. С. Некоторые особенности обменного взаимодействия в ортоферритах-ортохромитах / А. С. Москвин, И. Г. Бострем // Физика твёрдого тела.- 1977.- Т. 19.- С. 1616-1626.
- [5] Bleaney B. Anomalous Paramagnetism of Copper Acetate / B. Bleaney, K. D. Bowers // Proceedings of the Royal Society.- 1952.- Т. A214.- С. 451-465.
- [6] High-frequency dielectric and magnetic anomaly at the phase transition in  $\text{NaV}_2\text{O}_5$  / A. I. Smirnov, M. N. Popova, A. B. Sushkov, S. A. Golubchik, D. I. Khomskii, M. V. Mostovoy, A. N. Vasil'ev, M. Isobe, Y. Ueda // Physical Review B.- 1999.- Т. 61.- С. 14546-14551.